

鲁甸地震宏观震中建筑群震害分析与抗震韧性评估*

林旭川, 刘雪艳, 胡仁康, 张令心

(中国地震局工程力学研究所 中国地震局地震工程与工程振动重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150080)

摘要: 2014年的鲁甸地震使其宏观震中龙头山镇遭受毁灭性破坏, 整理龙头山镇城区(龙泉社区)192栋建筑信息, 并识别每栋建筑损伤情况。从区域防灾角度, 对龙头山镇建筑群的震害特点、致灾机理与减灾策略进行分析, 对该区域震后避难场所分布情况和恢复重建过程进行分析与讨论。基于提出的区域建筑群功能完整度指标, 对龙头山镇地震破坏与灾后重建各个阶段的功能完整度与恢复程度进行了量化分析。结果表明: 鲁甸地震表现出的“小震大灾”特征, 主要与地震动局部异常以及房屋整体抗震能力有关, 局部异常严重的震害也可能对全局震害产生决定性的影响; 当规则建筑具备必要的设防水准后, 往往可避免其在远超越设防水准地震下倒塌; 提出的结构功能完整度可比较合理地描述区域建筑群恢复的过程, 可为抗震韧性分析提供量化指标。

关键词: 建筑群; 城镇抗震韧性; 鲁甸地震; 地震破坏; 区域防灾

中图分类号: P315.194 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0666(2020)03-0449-07

0 引言

近几十年来, 我国城镇发生了翻天覆地的变化, 人口与财富愈发集中, 新旧建筑混杂, 也因此面临着日益严峻的地震灾害风险。特别是, 大部分新兴城镇尚未经受过地震的考验, 缺乏对破坏性地震的深入理解和应对经验。因此, 深入分析与总结近年来发生在我国城镇附近的破坏性地震, 将为我国城镇防灾减灾与应急救援工作提供重要参考。

2014年8月3日, 云南鲁甸发生6.5级地震, 震源深度12 km, 地震造成了617人死亡、3000余人受伤以及巨大的直接经济损失(李永强, 李兆隆, 2016)。该地震的宏观震中位于鲁甸县龙头山镇, 其强烈的地震作用造成了龙头山镇城区大部分建筑的严重破坏或倒塌。分析龙头山镇的破坏情况发现, 位于同一个地区的紧紧靠近的两个区域, 震害程度却差异明显。在鲁甸地震后2个月, 云南再次发生了比鲁甸地震震级更高、震源更浅的6.6级景谷地震(震源深度5 km), 但仅造成1人死亡、324人受伤, 两次地震的结果形成了巨大反差。因此, 探析上述反常

现象, 对深入理解区域地震成灾机理具有重要意义。同时, 龙头山镇遭遇毁灭性地震破坏后, 当地首先需要面对的问题是如何进行避难和安置, 其次是如何进行灾后重建。从系统角度, 对该城区的建筑群破坏、应急避难与恢复重建等情况进行分析, 有利于提升城镇抗震韧性的认知水平与建设能力。

本文基于2014年龙头山镇城区(龙泉社区)震害调查资料以及不同时期(震前、震后以及重建期)的卫星遥感资料, 结合近年来该区域震害的相关研究, 对龙头山镇的建筑进行逐一分析整理, 建立了各个建筑的结构信息与损伤状态数据, 从建筑群的视角开展震害机理与区域抗震韧性分析。

1 建筑群震害整理与分析

图1具体展示了龙头山镇的破坏情况, 在红虚线内, 房屋大部分倒塌或严重破坏, 而在红实线内, 建筑的破坏非常轻, 二者产生了鲜明的对比(Lin *et al.*, 2015)。笔者对龙头山镇城区(龙泉社区)192栋建筑的震害资料进行逐栋整理与分析, 并结合地震前后遥感数据、新闻(木胜玉,

* 收稿日期: 2020-04-13.

基金项目: 中国地震局工程力学研究所基本科研业务费专项资助项目(2018QJGJ02)与国家自然科学基金项目(U1939210)联合资助.

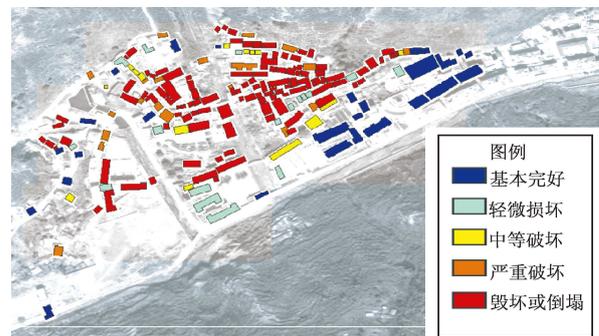
2014a) 等资料, 给出了 2014 年鲁甸地震发生后建筑群地震破坏空间分布, 如图 2 所示。根据《(构) 筑物地震破坏等级划分》(GB/T 24335—2009) 规定, 并参考《中国地震烈度表》(GB/T 17742—2008) 对破坏等级的描述, 将建筑的破坏等级分为 5 级, 并分别定义为基本完好、轻微损坏、中等破坏、严重破坏、毁坏或倒塌。上述标准均对建筑的损伤程度定义了 5 个等级, 尽管描述方式与评估流程有差异, 但其损伤等级的确定均综合考虑了构件的破坏、功能的损失与修复的难易程度等因素。

龙头山镇的建筑可分为 5 类: 钢筋混凝土框架结构 (RC 框架)、普通砌体结构、约束砌体结构和木架结构、土木结构。砌体结构分为普通 (无约束) 砌体结构和约束砌体结构, 二者的本质差别在于结构是否具有确保其整体性的抗震构造措施。木架结构的主体承重结构为木框架, 而土木结构的承重部件以生土或夯土为主, 木头用于加强结构的整体性。图 3 给出了该区域典型结构类型的破坏示例。图 3a 为钢筋混凝土框架结构, 底层残余层间位移角达 $1/18$, 大量梁柱端部严重破坏, 底层填充墙严重破坏, 破坏等级介于严重破坏与



图例: 大量房屋毁坏或倒塌区域 震害较轻的区域 河流

图 1 宏观震中龙头山镇建筑震害情况
Fig. 1 Seismic damage of the macro epicenter, Longtoushan town



图例
基本完好
轻微损坏
中等破坏
严重破坏
毁坏或倒塌

图 2 龙头山镇建筑群地震破坏空间分布
Fig. 2 Seismic damage spatial distribution of buildings in Longtoushan Town



(a) 钢筋混凝土框架结构严重破坏



(b) 砌体结构倒塌



(c) 木架结构严重破坏



(d) 土木结构倒塌

图 3 龙头山镇结构类型及其典型震害

Fig. 3 Structure types and their typical damage in Longtoushan Town

倒塌之间；图 3b 为约束砌体结构，图中左侧建筑的首层墙体出现了严重的 X 型开裂，由于地震作用过大，墙体裂缝贯穿了构造柱，而图中右侧建筑则整个底层彻底倒塌，破坏等级为倒塌；图 3c 为当地的木架结构，结构严重受损，墙体几乎彻底破坏，破坏等级为严重破坏；图 3d 为土木结构彻底坍塌，土木结构整体性普遍较差，且墙体强度较低。

需要指出的是，即使将震害较轻的区域包含在内，192 栋建筑中，倒塌建筑数量仍多达 122 栋，建筑的倒塌率高达 63.5%，而其中不乏经过正规设计且具有良好的抗震构造措施的公共建筑。图 4 给出了在建筑倒塌较集中区域记录到的地震动的拟加速度反应谱，当结构基本周期小于 1.0 s 时，实际地震动产生的水平作用力是规范规定的罕遇地震的 4~5 倍，该地震动的 PGA 将近 1.0 g (冀昆等, 2014)，甚至远远超越规范规定的 9 度区的罕遇地震的 PGA。中低层建筑的严重破坏和倒塌的主要原因是地震作用远远超出了设防水准 (陆新征等, 2014)，由于地震作用太大，不少建筑的底层彻底垮塌 (Lin *et al.*, 2015)，如图 3c 所示。虽然实际地震作用远远超出规范设计要求，对于结构形状规则、刚度分布均匀、填充墙分布均匀的结构，多以严重破坏为主，并未造成彻底倒塌，如图 3b 所示。

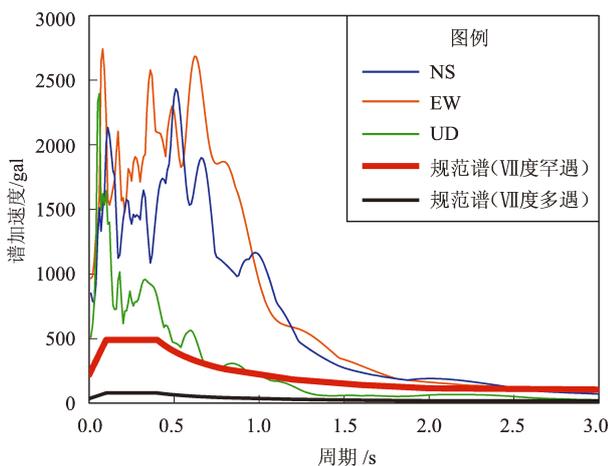


图 4 龙头山镇地震动记录拟加速度反应谱与规范设计反应谱的对比

Fig. 4 Comparison between the pseudo acceleration spectrum of the recorded ground motions in Longtoushan town and the designed spectrum

2 基于区域防灾视角的建筑群震害讨论

鲁甸地震的震害表现出了“小震大灾”的特征。地震的破坏力受到诸多因素的影响，既和地震产生的地面运动激烈程度有关，又和工程结构的抗震能力有关。根据中国地震局发布的地震烈度图 (木胜玉, 2014a)，云南鲁甸 6.5 级地震的 VI 度区的面积为 8 390 km²，VII 度区的面积为 1 580 km²，VIII 度区的面积为 290 km²，IX 度区的面积为 90 km² (图 5)。云南景谷 6.6 级地震的 VI 度区的面积为 9 780 km²，VII 度区的面积为 1 750 km²，VIII 度区的面积为 400 km²，IX 度区的面积为零 (木胜玉, 2014b)。

图 6 给出了这 2 个地震不同烈度区的比较，纵坐标的烈度区面积比为各个烈度区域的面积与各自地震 VI 度及以上烈度区的总面积的比值。景谷地震 VI 度及以上区域总面积要比鲁甸地震大 15%，但是震害却轻很多。景谷地震人员伤亡人数远远小于鲁甸地震，主要是因为人员伤亡情况很大程度上与房屋建筑的破坏与倒塌情况相关。从图 6 可以发现，2 个相当震级地震不同烈度区面积占总面积的比例大致相当，但鲁甸地震多了一个 IX 度区，有更多的能量集中在距离震源较近的区域，龙头山镇及其周边村镇正是位于该区内。一方面，鲁甸地震影响区房屋抗震能力相对较差且人口相对较稠密，容易导致地震的影响加重 (和嘉吉等，

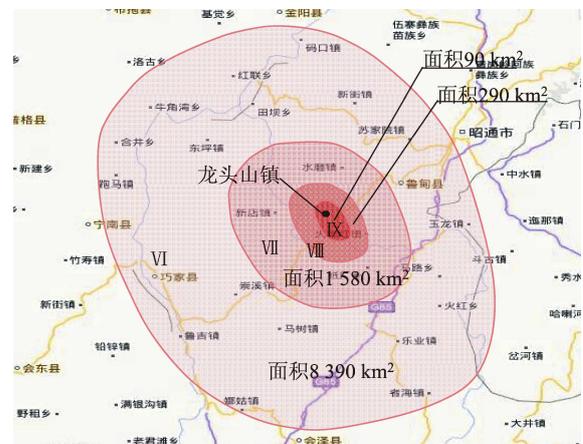


图 5 2014 年云南鲁甸 6.5 级地震烈度图
Fig. 5 Intensity map of 2014 Ludian M_s 6.5 earthquake in Yunnan province

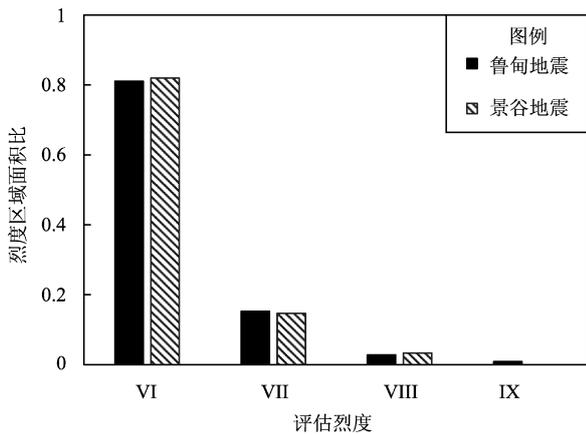


图6 鲁甸地震与景谷地震影响区比较
Fig. 6 Comparison of the affected area between the Ludian earthquake and Jinggu earthquake

2015); 另一方面, 局部区域异常强烈的地震动及其产生的异常严重震害也可能对全局产生决定性的影响, 龙头山镇部分区域(图1中红虚线包围区域)建筑群的毁坏与倒塌整体上加重了此次地震的震害与伤亡。

为了从建筑群的角度进一步分析龙头山镇地震致灾特点, 比较不同参数与震害的相关性, 对城区192栋建筑进行了分类统计, 给出了各类房屋中各种破坏程度的占比, 如图7所示。由图7a可见, 层数不同, 建筑发生破坏的可能性差异很大, 1~5层的建筑倒塌的比例分别达到了68.5%, 61.1%, 57.5%, 30.8%与20.8%。1~3层建筑中倒塌的比例非常高, 约%, 主要原因是低矮建筑里质量相对较差的自建房屋有相当比例; 而5层完好或轻微破坏的建筑超过%, 其中倒塌的建筑主要位于图1中红虚线包围的区域, 完好或轻微损坏的建筑位于红实线包围的区域。由此可见, 建筑的高度与可用的结构形式、结构的周期紧密相关, 这些结构属性与地震动特性相互结合, 对结构损伤破坏程度起着至关重要的影响。

结构类型不同, 建筑的抗震能力差异也很大, 普通砌体结构、土木结构与木架结构的倒塌率为74%~91%, 而RC框架与约束砌体结构的倒塌率在23%~25%(图7b)。一方面, 结构类型对震害的严重程度起着决定性的影响; 另一方面, 7度设防的RC框架结构和约束砌体结构, 即使在远远超越其设防水准的地震动作用下, 仍有相当高的“不倒”概率。历史上发生的破坏性地震, 往往出

现远高于设防水准的地震作用, 而结构设计又无法将设计水准提高到该水平。结构抗震设计既需确保房屋的安全, 又需充分考虑地震及其产生的地面运动巨大的不确定性, 而该问题一直没有一个合适的解决方案。对于区域与城市的抗震防灾而言, 虽然地震具有很大的不确定性, 当建筑比较规则且达到一定的抗震能力与构造措施时(如达到7度区的设防水准), 仍能很大程度上确保在超预期地震作用下建筑不倒塌, 这对减轻经济水平有限而地震频发区域的震害具有重要参考价值。从抗震韧性的角度看, 提高建筑的抗震能力, 从整体上降低区域建筑群的地震损伤程度, 将有利于区域的快速恢复, 并直接对区域抗震韧性的提升发挥重要作用。

鲁甸地震中以下因素也对该区域震害情况与震后救灾带来影响:

(1) 地形与场地。龙头山镇可分为截然不同

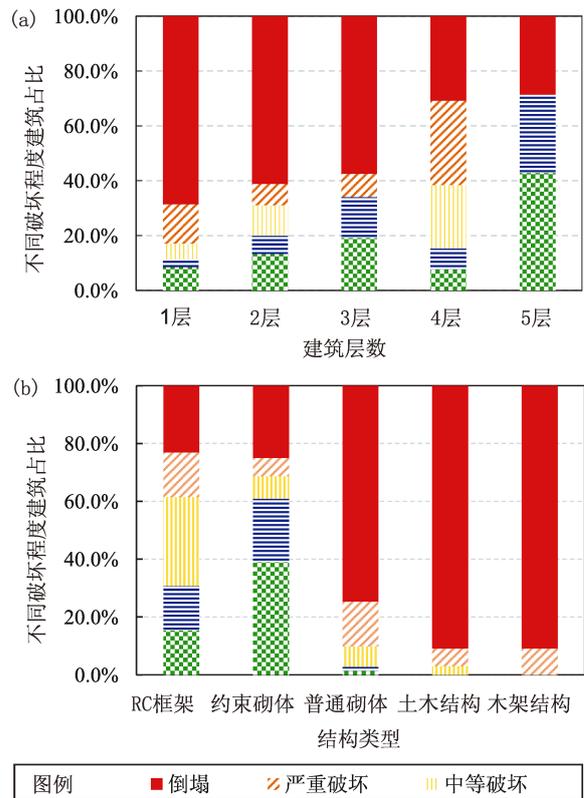


图7 不同层数 (a) 不同结构类型 (b) 房屋中各种破坏程度建筑的占比
Fig. 7 The proportion of each damage level for different numbers of stories (a) and different structure types (b)

的2个区域，一个区域建筑破坏非常严重，建筑主要位于一个“小土坡”上，另一个区域震害轻微，建筑主要沿河布置（图1）。这2个区域彼此相邻，且均位于IX度区内。震害非常严重区域记录到的PGA约1g，震害轻微区域虽无台站，但根据数值模拟的试算结果，实际的PGA非常小，应小于0.1g。地震作用在小范围内的巨大差异主要因为该区域复杂的地形与场地条件（魏勇，2018）。

(2) 地震发生时间和季节。鲁甸地震发生于8月3日白天，正好赶上学校放假，从而避免了学校建筑倒塌所致的人员伤亡。但地震后发生了大量滑坡，并引发了堰塞湖，更不幸的是该地区进入雨季，白天时被打通的道路，又因为傍晚的降雨而阻塞，日复一日，不仅加重了震害，也对救灾造成了非常不利的影 响。因此，地震发生的时间和季节对灾害的影响也不可忽略。

3 城镇恢复重建与抗震韧性

区域的抗震能力，不仅体现在抵御地震破坏的能力，还体现在遭受地震破坏后的应对处理能力与恢复重建能力。鲁甸地震中，龙头山镇遭到了严重的破坏，如何安排当地居民进行有效的避难与临时安置对防灾减灾具有重要意义，也是震后恢复工作的第一步。图8给出了该区域在地震后（主震发生后第17天）可设置帐篷与临时住房区域，共有7处。这些区域由预留地、广场、校园、院落等空地构成，分散在龙头山镇各处，用于安置失去居住场所的民众。其中，A位置的避难场所最大，地震前该处是一块空地。由于大量建筑的

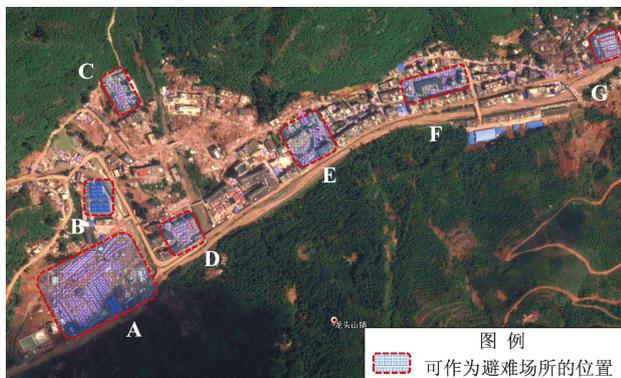


图8 龙头山镇震后临时避难区域分布
Fig. 8 Distribution of temporary shelters after the earthquake in Longtoushan Town

破坏与倒塌，导致村民需要中长期避难。截至2015年5月（9个月后），B处被去除但其周围重新开辟了新的避难场所，其他6处保留，A处仍然是主要避难场所，C处附近增加了一块空地。可见，在防灾规划中，预留充分的避难场所，对应急救援、控制次生灾害、方便灾后重建具有重要意义。

为了对龙头山镇的抗震韧性进行初步定量分析，本文基于现场震害调查建立的192栋建筑，结合不同时期遥感图片及Google earth图片，对不同时期该区域建筑群的功能完整性进行评估。单体建筑的功能完整度与建筑破坏的状态及其可修复性相关，针对不同的建筑破坏等级，粗略地给出建筑的结构功能完整度，如表1所示。需要指出的是，本文讨论的建筑功能仅包括房屋结构的力学功能，而不包含建筑的使用功能。房屋结构功能完好时，功能完整度取1.0，建筑倒塌时功能完整度取0.0。考虑到严重破坏及倒塌，建筑的功能受到的影响极大且修复困难，因此，严重破坏及倒塌的功能完整度取值明显低于其他等级。

表1 功能完整度取值

Tab. 1 Value determination of the function integrity degree

损伤状态	功能完整度 R
基本完好	1.0
轻微损坏	0.8
中等破坏	0.6
严重破坏	0.2
毁坏或倒塌	0.0

将区域内的所有单体建筑的功能完整度按照单体建筑总建筑面积加权平均，得到区域建筑群的功能完整度为：

$$R_{\text{region}} = \frac{\sum_{i=1}^n (R_i A_i)}{\sum_{i=1}^n A_i} \quad (1)$$

式中： R_{region} 为建筑群的功能完整度； i 为建筑编号； R_i 为第*i*个单体建筑的功能完整度； A_i 为第*i*个建筑的建筑面积。

根据功能完整度的定义，得到龙头山镇建筑群功能完整度随时间变化曲线，如图9所示，图中a, b, c, d这4个点对应的龙头山卫星遥感图片，如图10所示。地震发生前功能完整度为1.0，其状态如图10a所示，地震发生后整个城镇的功能完整度降到41%，如图10b所示；随着重建的启动，

部分未倒塌但是不易修复的房屋也被拆除，功能完整度进一步降低到 33%，如图 10c 所示。由于国家、地方政府与社会各界支持并重视龙头山镇的重建工作，龙头山镇在恢复过程中，社会、经济和工程资源基本上是充足的，地震发生后约 3 年零 3 个月，该区域重建完毕（薛涛，2017），此时功能完全恢复，功能完整度为 1.0，之后功能完整度保持 1.0 不变，图 10d 给出了 2018 年的状态。龙头山镇在遭遇严重破坏后，以年均 20% 的速度对其功能完整性进行恢复。可见，区域功能完整度指标，可以较好地描述区域地震破坏与恢复过程的状态，与概念基本相符。

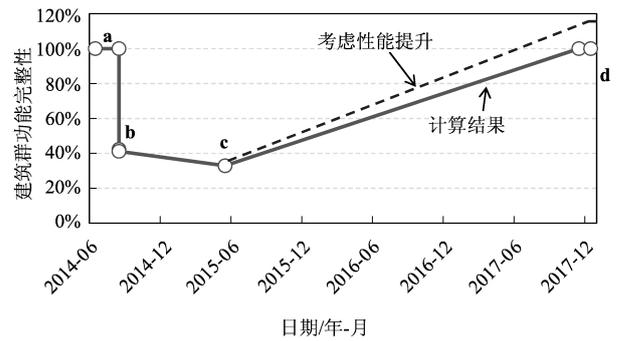


图 9 龙头山镇功能完整度随时间变化曲线

Fig. 9 Functional integrity degree - time relationship curve of Longtoushan town



图 10 龙头山镇在地震前后及重建过程中的遥感图片 (图 c, d 来源于 google earth)

Fig. 10 Remote sensing images of Longtousahn town at different periods
(Figures c and d are from google earth)

在重建过程中，龙头山镇除了保留部分严重破坏的建筑作为此次地震的纪念外，大部分严重破坏或倒塌的建筑均被彻底拆除，并在原先相对平坦的区域建立了抗震性能更好的民居与公共建筑，并环绕该城镇建立了新的道路，使其交通网络具有更高的冗余性。从这个意义上，该区域具备了比地震前更高的抗震能力和更完善的使用功能，功能的完整性应高于原先的 1.0，实际恢复曲线应为图 9 中的虚

线所示。针对不同的分析需要，需要对绝对功能完整度与相对功能完整度进行区分。

4 结论

本文整理了 2014 年鲁甸地震宏观震中龙头山镇城区的 192 栋建筑信息与损伤状态，从区域防灾的角度，对该建筑群破坏机理进行讨论，并对区域的

抗震韧性进行了量化分析, 得出主要结论如下:

(1) 鲁甸地震表现出“小震大灾”特征, 由于地形与场地的影响, 龙头山镇建筑群的地震破坏呈现了非常严重与非常轻微两块震害程度截然不同的区域, 总体上区域内建筑的倒塌率高达63.5%, 主要原因是由于地震动局部异常强烈。

(2) 虽然遭受了异常强烈的地震动作用(PGA 约1.0 g, 远远超过了IX度罕遇地震作用), 但部分建筑仍可免于倒塌, 可见当规则建筑具备必要的设防水准(Ⅶ度)后, 可很大程度上避免其在远超越设防水准地震下倒塌, 该结论可为经济能力不足区域的抗震防灾工作提供参考。

(3) 地形与场地、地震发生的时间与季度均对龙头山镇的震害与震后救灾产生了关键影响。

(4) 龙头山镇重建的过程显示, 预留充分的避难场所, 对应急救援、控制次生灾害、方便灾后重建具有重要意义。

(5) 建议了针对房屋结构的功能完整度指标, 得到龙头山镇建筑群功能完整度随时间变化曲线, 龙头山镇在地震发生后功能完整度降到了41%, 并以平均每年20%的速度进行功能恢复。该建议指标可比较合理地描述区域建筑群恢复的过程, 为抗震韧性分析提供量化指标。

参考文献:

- 和嘉吉, 卢永坤, 代博洋, 等. 2015. 鲁甸 M_s 6.5 与景谷 M_s 6.6 地震灾区房屋抗震能力差异分析[J]. 地震研究, 38(1):137-142.
- 冀昆, 温瑞智, 崔建文, 等. 2014. 鲁甸 M_s 6.5 地震强震动记录及震害分析[J]. 震害防御技术, 9(3):325-339.
- 李永强, 李兆隆. 2016. 2014年云南鲁甸6.5级地震致人死亡情况分析[J]. 中国地震, 32(4):787-800.
- 陆新征, 林旭川, 田源, 等. 2014. 汶川、芦山、鲁甸地震极震区地面运动破坏力对比及其思考[J]. 工程力学, 31(10):1-7.
- 木胜玉. 2014a. 中国地震局详解鲁甸6.5级地震烈度分布与震害(图)[EB/OL]. (2014-08-07)[2020-04-13]. <http://yn.people.com.cn/news/yunnan/n/2014/0807/c228496-21913280-2.html>.
- 木胜玉. 2014b. 云南公布景谷6.6级地震烈度图[EB/OL]. (2014-10-11)[2020-04-13]. <http://yn.people.com.cn/news/yunnan/n/2014/1011/c228496-22569466.html>.
- 魏勇. 2018. 基于强震动观测的鲁甸 M_s 6.5 地震场地效应分析研究[D]. 武汉:中国地震局地震研究所.
- 薛涛. 2017. 鲁甸6.5级地震灾后恢复重建全面完成[EB/OL]. (2017-11-30)[2020-04-13]. http://www.xinhuanet.com/local/2017-11/30/c_1122038595.htm.
- Lin X, Zhang H, Chen H, et al. 2015. Field investigation on severely damaged aseismic buildings in 2014 Ludian earthquake[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 14(1):169-176.
- GB/T 17742—2008. 中国地震烈度表[S].
- GB/T 24335—2009. 建(构)筑物地震破坏等级划分[S].

Regional Damage Analysis and Resilience Evaluation of Buildings in the Epicenter Region of 2014 Ludian Earthquake

LIN Xuchuan, LIU Xueyan, HU Renkang, ZHANG Lingxin

(Key Laboratory of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, Harbin 150080, Heilongjiang, China)

Abstract

The 2014 Ludian earthquake caused devastating damage to its macro epicenter, Longtoushan town. In this study, the structure information and damage states of 192 buildings in the downtown of Longtoushan (Longquan community) were sorted out and summarized. From the perspective of regional disaster prevention, the characteristics of the earthquake damage, the mechanism of disaster mitigation are studied by analyzing the buildings in Longtoushan town, and the the shelters and recovery process were examined. The function integrity index for regional buildings is proposed to evaluate the the recovery degree at different stages of time. The phenomenon that an relatively small earthquake led to serious seismic damage was primarily attributed to the local anomalies of ground motions and seismic capacity of buildings. A regular building with the necessary seismic fortification measures is largely able to avoid its collapse in an earthquake far beyond its designed fortification level. The proposed functional integrity index can reasonably describe the recovery process of regional buildings and provide a quantitative analysis on the regional seismic resilience.

Keywords: buildings; urban seismic resilience; Ludian earthquake; earthquake damage; regional disaster prevention